

41. НИОБИЙ

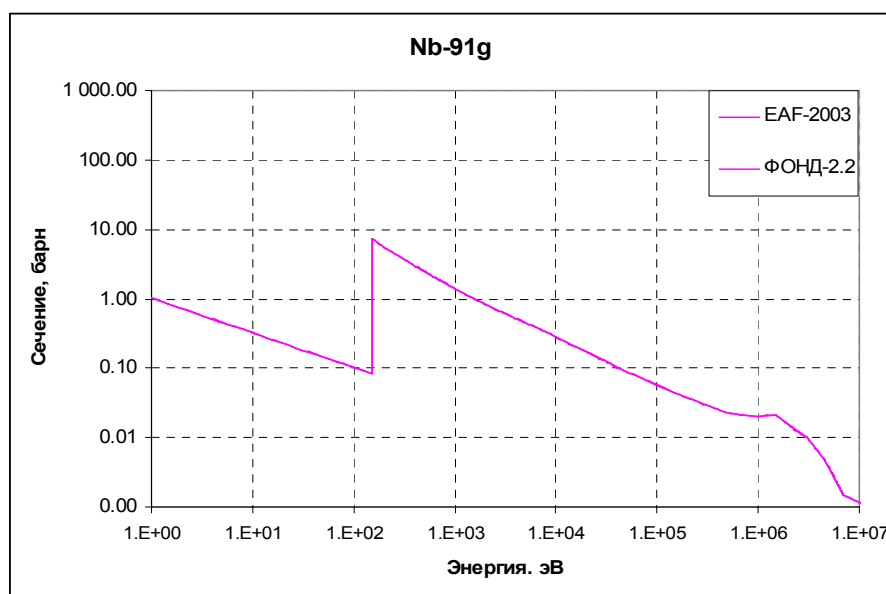
Природный ниобий содержит всего один изотоп - ^{93}Nb , однако в библиотеку РОСФОНД должны быть включены нейтронные данные еще для 9 долгоживущих изотопов и изомеров ниобия.

41.1. Ниобий-91^g

Радиоактивен. Испытывает позитронный распад ($T_{1/2}=680$ г.) в стабильный ^{91}Zr .

В ФОНД-2.2 содержится оценка Дж. Копецкого и Д. Ниеропа 1992 г. В EAF-2003 (Форрест, Копецкий, Саблет) эта оценка не пересмотрена, но сечения реакций, в которых образуются изомеры, представлены в файле MF=10.

На рисунке приведена энергетическая зависимость сечения захвата.



Сечение захвата Nb-91g

В нижеследующей таблице приведены (в барнах): сечение захвата в тепловой точке, резонансный интеграл и сечения основных реакций, усредненные по спектру деления программой INTER.

	σ_c (0.0253 эВ)	RI_c	Средние сечения реакций на спектре деления			
			n,gamma	n,2n	n,p	n,alpha
EAF-2003	6.45	11.2	0.0181	2.73E-04	2.19E-03	1.01E-04

Заключение

В РОСФОНД включить оценку из EAF-2003,сохранив в файле MF=10 лишь данные об образовании долгоживущего изомера в реакции (n,p') - MT=4. Данные об образовании Nb-92m в реакции (n,γ) - MT=102 – уже содержатся в файле MF=9. Включить в файл MF=3 секции сечений всех реакций (кроме MT=4), парциальные сечения которых содержатся в файле MF=10 библиотеки EAF-2003 (MT=16, 22, 28, 32, 104, 105, 106, 111).

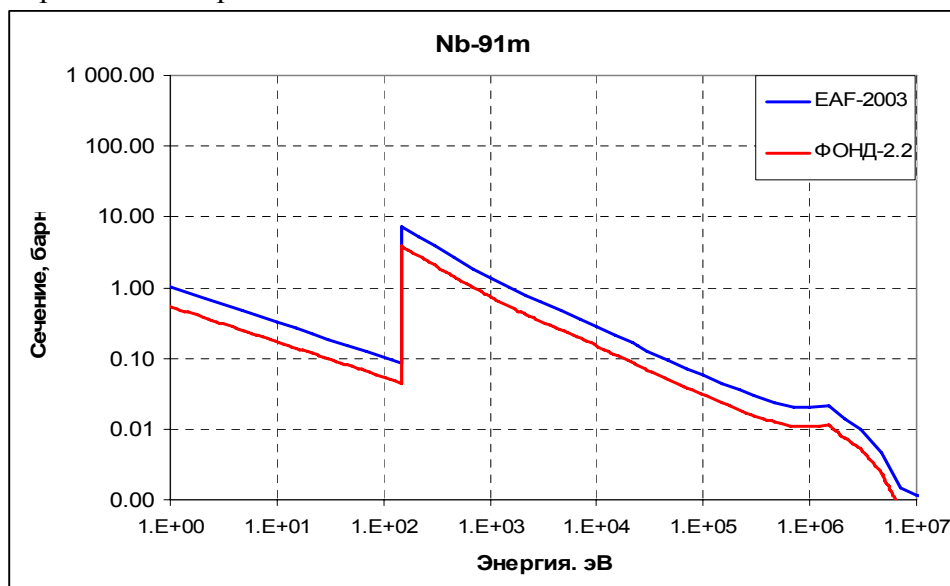
Автор отбора данных
Николаев М.Н.

41.2. Ниобий-91^m

Долгоживущий изомер. Испытывает позитронный распад ($T_{1/2}=60.9$ дн.) в стабильный ^{91}Zr .

В ФОНД-2.2 содержится оценка Копецкого и Ниеропа 1992 г. В EAF-2003 (Форрест, Копецкий, Саблет) эта оценка пересмотрена. Сечения реакций, в которых образуются изомеры, представлены в файле MF=10.

На рисунке приведена энергетическая зависимость сечения захвата.



Сечение захвата Nb-91m

Как видно, сечение захвата при пересмотре везде одинаково повышено (в 1.89 раза). В таблице сравниваются средние значения сечений разных реакций.

	σ_c (0.0253 эВ)	RI_c	Средние сечения реакций на спектре деления			
			n,gamma	n,2n	n,p	n,alpha
ФОНД-2.2	3.42	6.0	0.0096	1.22E-04	2.19E-03	1.01E-04
EAF-2003	6.45	11.2	0.0181	Добавить!	1.05E-02	2.35E-05

Заключение

В РОСФОНД включить оценку из EAF-2003. Включить в файл MF=3 секции сечений реакций, которые содержатся в файле MF=10 библиотеки EAF-2003 (MT=16, 22, 28, 32, 104, 105,106, 111). Данные об образовании Nb-92m в реакции (n, γ) - MT=102 - в файле MF=9 уже содержатся. Файл MF=10 исключить.

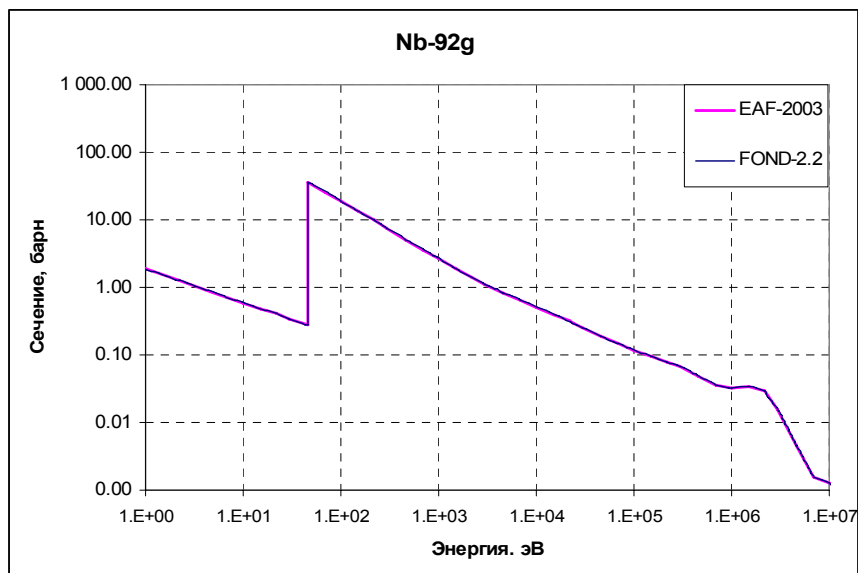
Автор отбора данных
Николаев М.Н.

41.3. Ниобий-92^g

Радиоактивен. Испытывает позитронный распад ($T_{1/2}=3.6 \cdot 10^7$ г.) в стабильный ^{92}Zr .

В ФОНД-2.2 содержится оценка Копецкого и Ниеропа 1992 г. В EAF-2003 (Форрест, Копецкий, Саблет) эта оценка пересмотрена. Сечения реакций, в которых образуются изомеры, представлены в файле MF=10.

На рисунке приведена энергетическая зависимость сечения захвата.



Сечение захвата Nb-92g

Как видно, сечение захвата сохранено прежним.

В нижеследующей таблице приведены (в барнах): сечение захвата в тепловой точке, резонансный интеграл и сечения основных реакций, усредненные по спектру деления программой INTER. Как видно, сечения пороговых реакций существенно пересмотрены.

	σ_c (0.0253 эВ)	RI_c	Средние сечения реакций на спектре деления			
			n,gamma	n,2n	n,p	n,alpha
ФОНД-2.2	11.79	48.1	0.0330	5.95E-03	2.55E-03	2.17E-04
РОСФОНД	11.79	48.1	0.0330	2.78E-03	8.26E-04	1.18E-2

Заключение

В РОСФОНД включить оценку из EAF-2003, сохранив в файле MF=10 лишь данные об образовании долгоживущего изомера в реакции (n,n') - MT=4. Включить в файл MF=3 сечения остальных реакций, которые содержатся в файле MF=10 библиотеки EAF-2003 (MT=22, 32, 33, 34, 105, 106, 107, 111). Включить в файл MF=9 данные об образовании Nb-91m в реакции (n,2n); данные об образовании Nb-92m в реакции (n, γ) - MT=102 – в этом файле уже содержатся.

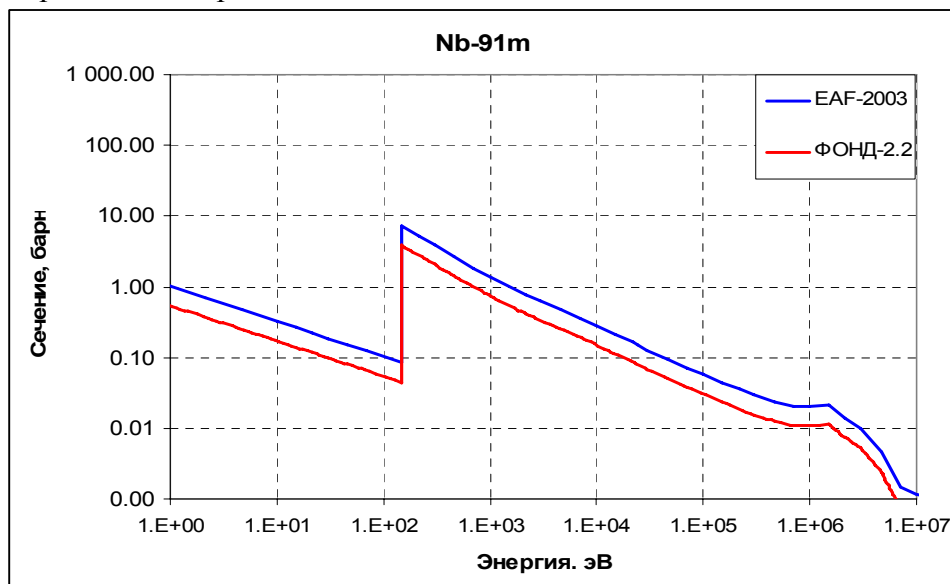
Автор отбора данных
Николаев М.Н.

41.4. Ниобий-92^m

Долгоживущий изомер. Испытывает позитронный распад ($T_{1/2}=10.15$ дн.) в стабильный ^{92}Zr .

В ФОНД-2.2 содержится оценка Копецкого и Ниеропа 1992 г. В EAF-2003 (Форрест, Копецкий, Саблет) эта оценка пересмотрена. Сечения реакций, в которых образуются изомеры, представлены в файле MF=10.

На рисунке приведена энергетическая зависимость сечения захвата.



Сечение захвата Nb-91m

В таблице сравниваются средние значения сечений разных реакций.

	σ_c (0.0253 эВ)	RI_c	Средние сечения реакций на спектре деления			
			n,gamma	n,2n	n,p	n,alpha
ФОНД-2.2	3.42	6.0	0.0096	1.22E-04	2.19E-03	1.01E-04
EAF-2003	6.45	11.2	0.0181	4.505E-3	1.05E-02	2.35E-05

Ясно, что надежность оцененных данных для рассматриваемых нейтрон-дефицитных нуклидов невысока.

Заключение

В РОСФОНД включить оценку из EAF-2003. Включить в файл MF=3 секции сечений остальных реакций, которые содержатся в файле MF=10 библиотеки EAF-2003 (MT=16, 32, 33, 34, 105, 106, 107, 111). Включить файл MF=9 с данными о вероятностях образования долгоживущих изомеров в реакциях (n,2n) – MT=16 и (n, γ) – MT=102 взяв информацию из файла MF=10 библиотеки EAF-2003. Файл MF=10 исключить.

Автор отбора данных
Николаев М.Н.

41.5. Ниобий-93⁹

Содержание в природной смеси -100%.

В современных библиотеках оцененных нейтронных данных фигурируют три различных оценки:

- 1) В.Г.Проняев, 1988 г. – в библиотеках БРОНД-2 и ФОНД-2.2.
- 2) M.Chadwick,P.Young,D.L.Smith, 1997 г. Выполнена для ENDF/B-VI, mod.3; содержится также в ENDF/B-VII и JEFF-3.1.
- 3) M.Kawai, N.Yamamoto, 1988 с пересмотром резонансных параметров и добавлением данных об образовании фотонов в нейтронных реакциях в 1994 г. Содержится в JENDL-3.3 и CENDL-2.

1. Резонансная область

1.1. Область разрешенных резонансов.

Область разрешенных резонансов описывается во всех трех оценках. В таблице 1. приведены характеристики этой области.

Таблица 1. Область разрешенных резонансов.

Оценка	Е гран., эВ	Число s- рез.-ов.		Еmax, эВ	Число p-рез.-ов.				Еmax, эВ	Полное число рез.- ов
Проняев и др.	7000	99		7306	100				7331	199
		J=4	J=5		J=3	J=4	J=5	J=6		
		52	47		5	47	34	13		
Каваи и др.	7000	139		7306	62				7331	201
		J=4	J=5		J=3	J=4	J=5	J=6		
		68	70		16	17	17	12		
Чедвик и др.	7350	148		7306	46				7331	194
		J=4	J=5		J=3	J=4	J=5	J=6		
		66	81		8	10	12	15		

Как видно из таблицы, числа рассмотренных в оценках резонансов близки, однако, в определении четностей и спинов резонансов имеются существенные различия. Заметим, что в оценке Чедвика распределение резонансов по спинам максимально строго соответствует предположению, что плотность резонансов пропорциональна $2J+1$. В оценке Каваи плотность резонансов с малым спином завышается относительно этой закономерности, а в оценке Проняева вовсе ей не соответствует.

Имеются различия и принимаемых нейтронных и радиационных ширинах резонансов. Параметры Каваи и др. сильнее отличаются от оценки, принятой Проняевым, чем параметры, принятые Чедвиком. Мерой различий может служить сумма резонансных интегралов, рассчитанная по приводимым параметрам в одноуровневом приближении Брайта-Вигнера:

$$RI = \frac{\pi}{2} 2.608 * 10^6 \left(\frac{AWR + 1}{AWR} \right)^2 \frac{(2J+1)}{2 * (2I+1)} \frac{\Gamma_n}{E_r^2} \frac{\Gamma_\gamma}{(\Gamma_n + \Gamma_\gamma)}.$$

Для ниобия со спином $9/2$ величина $2I+1=10$, $AWR=92.108$, а остальные параметры определяются из файла. Сумма вычисленных таким образом резонансных интегралов

(обозначим ее SRI), разумеется, не учитывает вклад низких энергий. Различия в этой величине таковы:

БРОНД-2 : SRI=8.412 барн;

LENDL-3.3:SRI=7.972 барн;

ENDF/B-7: SRI=8.207 барн.

Различия не превышают погрешности, приписанной полному резонансному интегралу Мухабхабом (8.5 ± 0.5 барн). Однако вклады отдельных резонансов в суммарный интеграл сплошь и рядом различаются на $\pm 10 - 20\%$, а для слабых резонансов и на $30 - 4\%$ и более.

Заметим, что в описаниях оценок их авторы не ссылаются на какие-либо экспериментальные работы, дополняющие информацию, принятую во внимание в справочнике Мухабхаба¹. Рекомендованные там тепловое сечение и резонансный интеграл были им подтверждены и в оценке 2003 г.².

В наборе резонансов Каваи и др. присутствует один “лишний” слабый резонанс при 184.3 эВ ($\Gamma_n = 2.364 \cdot 10^{-4}$ эВ). Р-резонанс при 6796 эВ ($\Gamma_n = 0.742$ эВ), присутствующий в двух других оценках, заменен s- резонансом при 6802 эВ ($\Gamma_n = 0.6467$ эВ).

В оценке Чедвика отсутствует целых 7 резонансов, наличествующих в двух других оценках и в справочнике Мухабхаба 1984 г. – все в интервале от 5 до 7 кэВ.

Последнее обстоятельство, неоправданное распространение области разрешенных резонансов за энергию последнего приводимого резонанса и отсутствие в оценке области неразрешенных резонансов побуждают не принимать ее во внимание при отборе данных для РОСФОНДа. Что касается двух других оценок, то трудно обосновать весомое предпочтение одной из них.

Сравним теперь энергетические зависимости плотностей уровней, следующие из рассматриваемых оценок. Разделим интервал от 0 до 7 кэВ на две равные части и сравним числа s- и р-резонансов в каждой из них.

Таблица 2. Сравнение чисел резонансов в равных соседних интервалах энергии

Оценка	Число s- резонансов.		Число р- резонансов	
	От 0 до 3.5 кэВ	От 3.5 до 7 кэВ	От 0 3.5 кэВ	От 3.5 до 7 кэВ
Проняев и др.	44	51	55	43
Каваи и др	56	77	43	18
Чедвик и др.	63	81	35	9

Как видим, во всех оценках число р-резонансов во втором интервале оказывается меньшим, чем в первом, что представляется довольно странным, если учесть, что в рассматриваемом диапазоне энергий средняя нейтронная ширина р-резонансов меняется пропорционально $E^{3/2}$ и в первом из рассматриваемых резонансов можно было бы ожидать большего пропуска слабых р-резонансов, чем во втором.

В то же время число s- резонансов во втором интервале во всех оценках оказывается заметно больше, чем в первом. Есть основания полагать, что избыток s-резонансов во втором интервале обусловлен неправильной идентификацией их четности. Так, если предположить, что 21 “лишний” s-резонанс в оценке Каваи являются на самом деле р-резонансами, то число этих резонансов во втором интервале достигнет $18 + 21 = 39$ и станет достаточно близким к числу р-резонансов в первом интервале. В этом случае не потребуются никаких предположений о пропуске слабых резонансов. Полное число s-резонансов до 7 кэВ станет равным 112 ($\langle D_s \rangle = 62.5$ эВ), а р-резонансов – 82 ($\langle D_p \rangle = 85.4$ эВ).

Если предположить, что в первом интервале s-резонансы более корректно идентифицированы в оценке Проняева, то число “лишних” s-резонансов во втором

¹ S.F.Mughabghab et. al. Neutron Cross Sections. Vol.1. Neutron Resonance Parameters and Thermal Cross Sections. Academic Press. 1981.

² Mughabghab S.F. INDC(NDS)-440, Feb.2003.

интервале оказывается равным всего 7. Если эти 7 резонансов на самом деле являются р-резонансами, то числа р-резонансов в первом и во втором интервалах станут близки друг к другу (55 и 50). При этом соотношение между s- и р-резонансами оказывается более естественным: полное число s-резонансов станет равным 88 ($\langle D_s \rangle = 79.5 \text{ эВ}$), а р-резонансов – 105 ($\langle D_p \rangle = 66.6 \text{ эВ}$). Примем, что плотность уровней пропорциональна $2J+1$ и не зависит от четности (а именно так и принимается при оценке сечений в области неразрешенных резонансов); тогда число р-резонансов (могущих иметь спины 3, 4, 5 и 6) должно превосходить число s-резонансов (могущих иметь спины 4 и 5) ровно в два раза. Если принять, что все s-резонансы разрешены и их число равно 88, то ожидаемое число р-резонансов составляет 176, из которых примерно 70 наиболее слабых пропущены. Поскольку для р-резонансов нейтронные ширины в рассматриваемом энергетическом интервале в среднем много меньше радиационных, вклад в резонансный интеграл пропущенных р-резонансов с очень малыми нейтронными ширинами должен быть весьма мал.

В оценке Чедвика число резонансов, идентифицированных как s-резонансы, столь велико, а число р-резонансов во втором интервале столь мало, что для устранения явного противоречия приходится предположить, что часть s-резонансов и в первом интервале идентифицирована ошибочно. В этом еще один минус этой оценки.

На рис. 1 и 2 сравниваются оцененные сечения в области разрешенных резонансов, представленные в мультигрупповой форме. Расхождения невелики за исключением интервалов, содержащих последние резонансы в рассматриваемой области. Расхождения в мультигрупповых сечениях отражают погрешности, с которыми известны сечения.

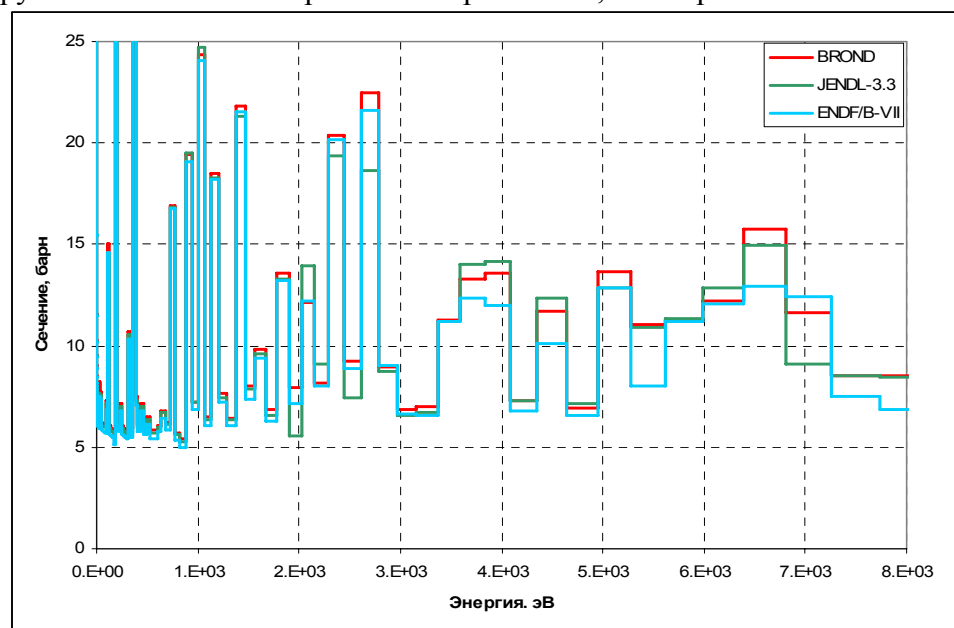


Рис. 1 Мультигрупповые полные сечения в области разрешенных резонансов

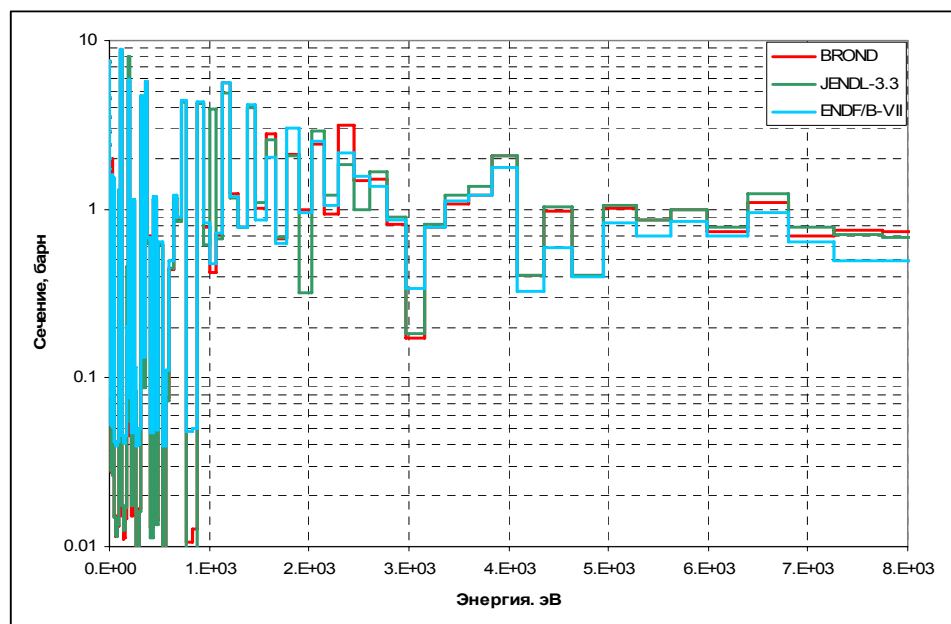


Рис.2. Мультигрупповые сечения радиационного захвата в области разрешенных резонансов.

1.2. Область неразрешенных резонансов

В оценке Проняева эта область простирается от 7 до 50 кэВ, т.е. превосходит порог неупругого рассеяния с возбуждением первого уровня (30.4 кэВ), но не захватывает область, где возможно возбуждение 2-го уровня (686 кэВ).

В оценке Каваи область неразрешенных резонансов распространена до 100 кэВ, т.е. в ней также возможно неупругое рассеяние с возбуждением только первого уровня. Заметим, что в случае ниобия неупругое рассеяние даже при 100 кэВ в сто с лишним раз меньше сечения радиационного захвата, так что распространение области неразрешенных резонансов до этой энергии вполне оправдано (нерезонансная «подложка» за счет неупругого рассеяния не исказит факторов резонансной самоэкранировки).

В обеих оценках сечения в области неразрешенных резонансов рассчитываются по заданным средним резонансным параметрам; в файле MF=3 задаются лишь нерезонансные «подложки». В оценке Проняева эта подложка обусловлена почти исключительно неупругим рассеянием (вклады реакций (n,p) и (n, α) чрезвычайно малы). В оценке Каваи введена подложка, корректирующая сечение захвата, рассчитанное по средним резонансным параметрам, которая при энергиях ниже 30 кэВ отрицательна, а выше – положительна и при 100 кэВ достигает 10% от вклада, рассчитанного по резонансным параметрам.

В обеих оценках средние резонансные параметры приводятся для s- и p-волн и не зависят от энергии, но заданы в формате, предусматривающем описание энергетической зависимости.

В табл.3 приводятся значения средних резонансных параметров в сравниваемых оценках. Приведены также следующие из них нейтронные силовые функции.

Таблица 3. Средние резонансные параметры.

J^π	Оценка Проняева и др. (R=0.67025)				Оценка Каваи и др. (R=0.64765)			
	D	Γ_n^0	S_n	Γ_γ	D	Γ_n^0	S_n	Γ_γ
4^+	178.92	0.00716	0.40	0.165	213.31	0.0085323	0.40	0.172
5^+	146.39	0.00586	0.40	0.165	174.52	0.006981	0.40	0.172
3^-	230.04	0.118	5.13	0.19	274.25	0.1832	6.68	0.172
4^-	178.92	0.0912	5.10	0.19	213.31	0.14249	6.68	0.172
5^-	146.39	0.0747	5.10	0.19	174.52	0.11658	6.68	0.172
6^-	123.87	0.0632	5.10	0.19	147.67	0.098646	6.68	0.172

Среднее расстояние между s-резонансами в оценке Проняева равно 80.5 эВ, что почти совпадает с оценкой по области разрешенных резонансов в интервале до 3.5 кэВ (79.5 эВ). Среднее расстояние между p-резонансами равно 40.25 эВ, вместо 66.6 эВ, ожидаемых из области разрешенных резонансов после коррекции на погрешность оценки четности. Это подтверждает вывод о пропуске примерно 40% слабых p-резонансов в области ниже 7 кэВ, сделанный для оценки Проняева в разделе 1.1.

Среднее расстояние между s-резонансами в оценке Каваи равно 96 эВ, что намного превышает величину, следующую из этой же оценки в области разрешенных резонансов (даже если в нее ввести коррекцию на погрешность в определении четности резонансов). Среднее расстояние между p-резонансами равно 48 эВ, что также трудно согласовать с данными, следующими из области разрешенных резонансов.

Для s-волны эти расхождения, однако, компенсируются различием в приведенных нейтронных ширинах так что силовые функции s-волны в точности совпадают. Для p-волны приведенные нейтронные ширины в оценке Каваи настолько превышают принятые Проняевым, что силовые функции для p-волны оказываются больше несмотря на меньшую плотность уровней.

Чтобы сделать заключение о преимуществе той или иной оценки необходимо сравнить следующие из них сечения с имеющимися экспериментальными данными.

На рис. 3 и 4 оцененные полное сечение и сечение захвата (о области неразрешенных резонансов - в мультигрупповой форме) сравниваются с результатами экспериментов.

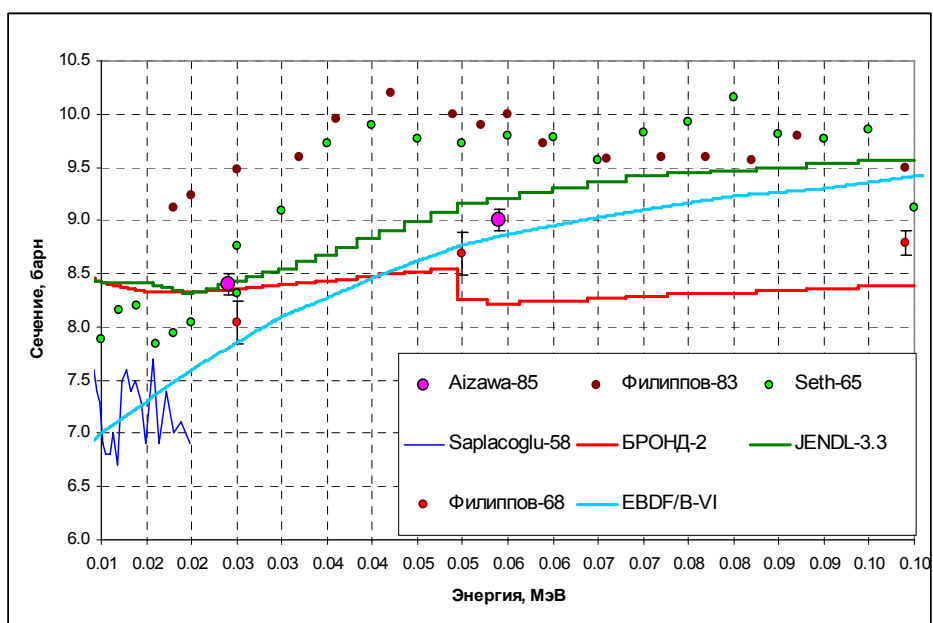


Рис.3. Полное сечение в области неразрешенных резонансов

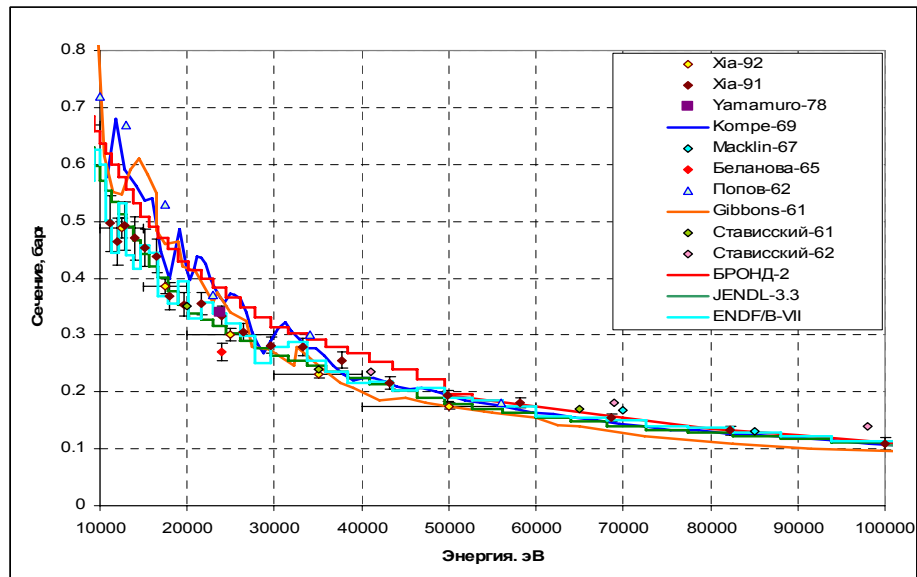


Рис.4. Сечение радиационного захвата в области неразрешенных резонансов.

В оценке Каваи к сечениям, рассчитанным по резонансным параметрам, добавляются плавные подложки, заданные поточечно в файле MF=3. Эти подложки приведены на рис. 5.

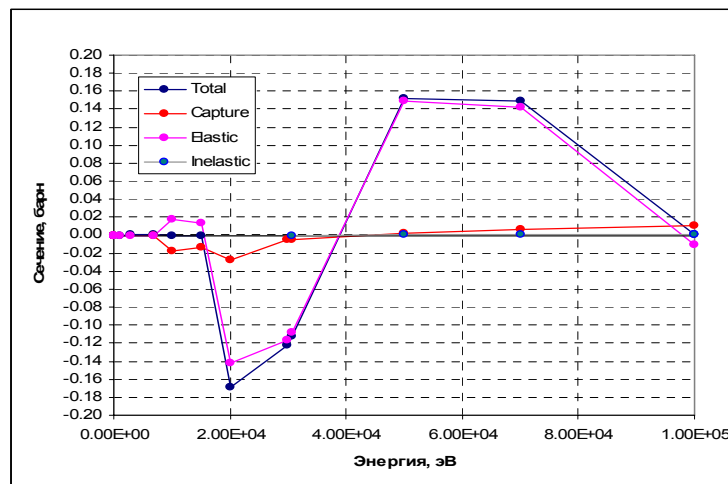


Рис. 5. Нерезонансные подложки к резонансным сечениям в оценке JENDL-3.3.

Как видно из рис. 2, сечения захвата в области неразрешенных резонансов в ENDF/B-VII и в JENDL-3.3 практически совпадают и опираются на новейшие данные Xia, проходящими между точками Ямамура и Белановой. Оценка Проняева, выполненная до появления данных Xia, естественно, опирается на результаты более ранних экспериментов по детальному измерению сечения захвата. Плавная подложка, введенная в сечение захвата, не превышает 0.02 барна и если ее убрать, то качество согласия оцененных и экспериментальных данных не ухудшится.

Что касается полного сечения, то оценка ENDF/B-VII, ориентированная при низких энергиях на данные Саплакоглу, представляется заниженной: на границе с областью разрешенных резонансов при этом получается резкий скачок полного сечения (см. рис.1). Подобные скачки обнаруживаются и в двух других оценках, но он существенно меньше.

Оценки полного сечения Проняева и Каваи при энергии ниже 30 кэВ (порог неупругого рассеяния) практически совпадают и согласуются с совокупностью экспериментальных данных. При более высоких энергиях оценка Проняева явно занижена, а оценка Каваи представляется несколько завышенной. Причины расхождений в экспериментальных объяснить, разумеется, затруднительно. При наличии этих

расхождений введение нерезонансной подложки в сечение рассеяния и в полное сечение при энергиях ниже 70 кэВ, как это сделано в JENDL-3.3, не представляется оправданным.

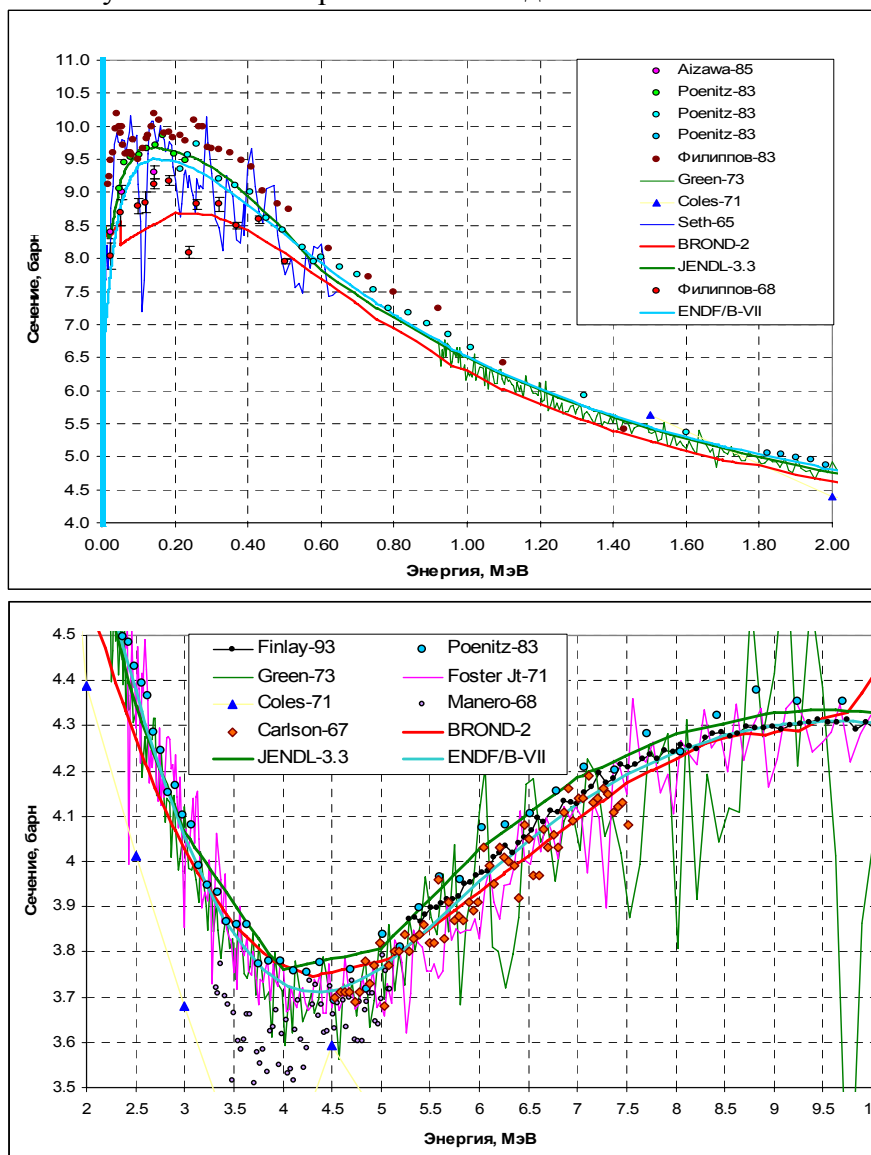
Подводя итог рассмотрению оцененных данных в резонансной области, приходим к заключению, что из трех сравниваемых оценок в области разрешенных резонансов целесообразно принять оценку Проняева, а в области неразрешенных резонансов – оценку Каваи, устранив в ней плавные подложки (кроме очень малой подложки за счет сечения неупругого рассеяния).

2. Сечения вне резонансной области.

2.1. Полное сечение.

Оценки полного сечения вне резонансной области сравниваются друг с другом и с экспериментальными данными на рис. 6.

Ниже 3 МэВ оценки ENDF/B-VII и JENDL-3.3 очень близки друг к другу и неплохо согласуются с совокупностью экспериментальных данных.



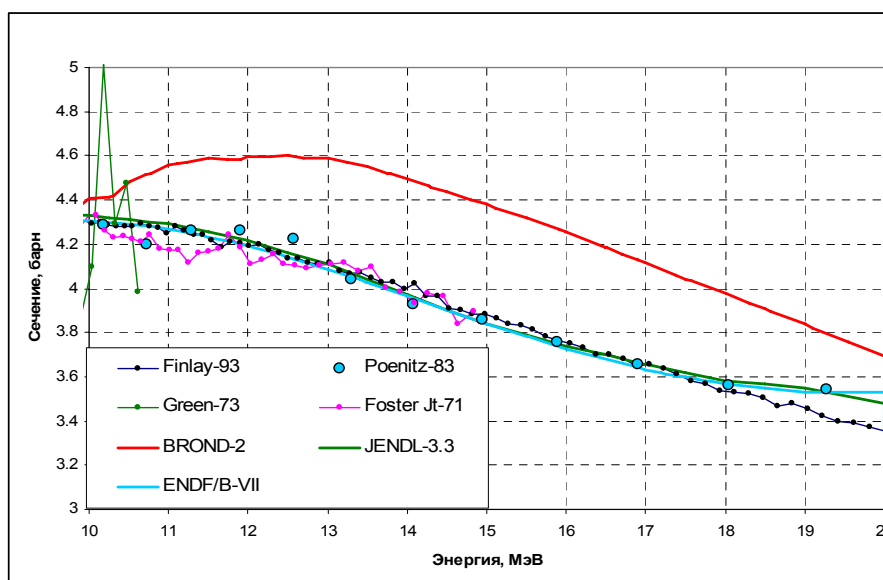


Рис. 6. Полное сечение вне резонансной области

При более высоких энергиях оценка ENDF/B-VII лучше согласуется с результатами Финля (за исключением области выше 18 МэВ, где данные Финля расходятся с результатами Пёнитца), а также с совокупностью более ранних измерений.

Представляется целесообразным до 3 МэВ принять в РОСФОНД оценку полного сечения из JENDL-3.3, а при более высоких энергиях – из ENDF/B-VII.

2.2. Сечение радиационного захвата

Сечение радиационного захвата вне резонансной области показано на рис. 7. Оценка Проняева представляется оптимальной и рекомендуется в РОСФОНД.

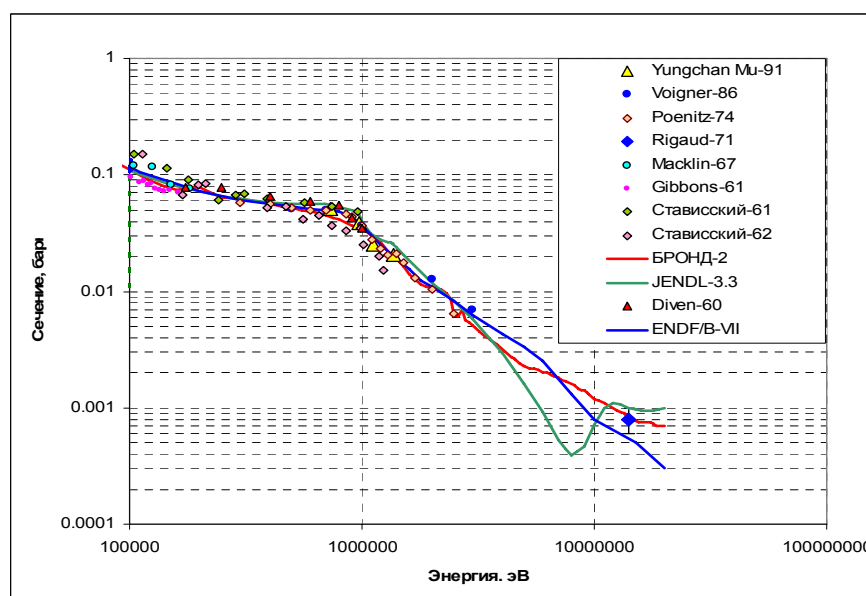


Рис. 7. Сечение радиационного захвата

2.3. Сечение неупругого рассеяния.

На рис. 8 оценки сечения неупругого рассеяния сравниваются с экспериментальными данными. Оценки хорошо согласуются друг с другом и более или менее согласуются с экспериментальными данными. Обращает на себя внимание

“зазубрина” в оцененных сечениях неупругого рассеяния при 2 МэВ, проявившаяся в оценках Каваи и Чедвика. При 2 МэВ лежит порог реакции ($n, n'\alpha$), но ее сечение столь мало (даже при 14 МэВ едва достигает до 2 – 3 миллибарн), что конкуренция с ней не может служить причиной “зазубрины”. На рис. 8 показаны две составляющие сечения неупругого рассеяния – с возбуждением дискретных уровней и с возбуждением континуума по оценке JENDL-3.3. Ни в одной из этих составляющих никаких “зазубрин” не наблюдается. Ясно, что ее причина кроется в ненадлежащей оценке сечений этих составляющих вблизи порога возбуждения континуума.

В оценке Проняева подобной аномалии не наблюдается и вообще до 4 МэВ эта оценка выглядит лучше других. При более высоких энергиях обоснованней представляется оценка Чедвика, учитывающая данные Симакова и Томпсона, которые в других оценках полностью игнорируются.

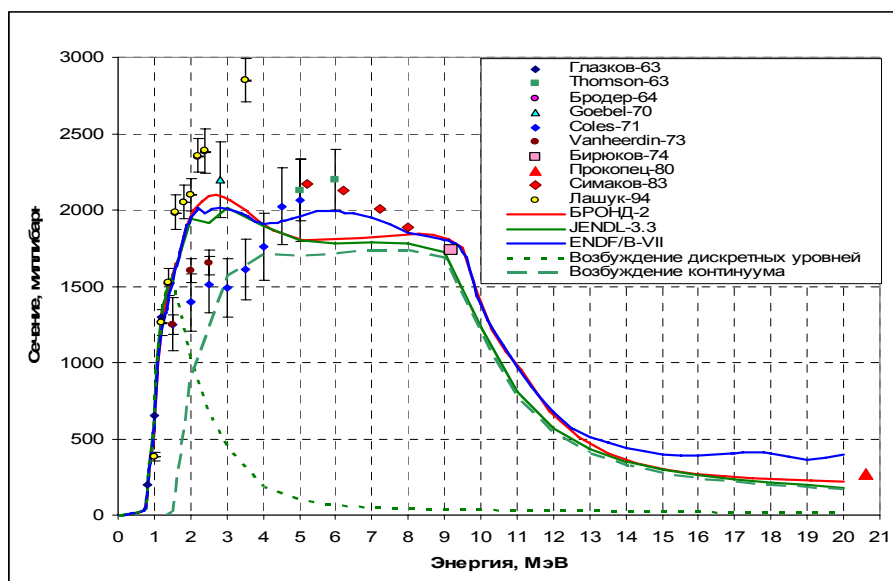


Рис. 8. Сечение неупругого рассеяния

В таблице 4 схемы уровней, принятые при расчете сечений и спектров неупругого рассеяния, сравниваются со схемой уровней из базы данных PCNUDAT (2002). Как видно, оценка Проняева удовлетворяет этой схеме наилучшим образом.

Представляется целесообразным принять в РОСФОНД для сечений неупругого рассеяния оценку Проняева, откорректировав сечение возбуждения континуума уровней так, чтобы в интервале 4-8 МэВ полное сечение неупругого рассеяния совпало с оценкой, принятой в ENDF/B-VII.

Таблица 4. Схемы уровней Nd-93

№	PCNUDAT, Е, кэВ	J π	№	БРОНД-2, Е, кэВ	№	JENDL-3.3 Е, кэВ	№	ENDF/B-VII. Е, кэВ
0	0	9/1+						
1	30.82	1/2-	1	30.4	1	30.73	1	30.73
2	687.0	3/2-	2	686	2	686	2	679.9
3	743.9	7/2+	3	744	3	744	3	744
							4	801
4	808.58	5/2+	4	808.7	4	808.7	5	808.
5	810.4	5/2-	5	810.1	5	810.1		
6	949.83	13/2+	6	949.9	6	949.9	7	949.9
7	970	1/2-, 3/2-						
8	978.94	11/2	7	979.1	7	979.1	8	979
9	1082.67	9/2+	8	1082.6	8	1082.6	9	1080
10	1126.9	5/2	9	1279				
11	1284.4	1/2+						
12	1290	1/2-, 3/2-			9	1290		

13	1297.2	9/2+	10	1297.4	10	1297.4		
14	1315.1	5/2-	11	1315.6	11	1315.6	10	1300
15	1330	3/2+,5/2+					11	1320
16	1335.2	17/2	12	1335.1	12	1335.1	12	1330
17	1364	5/2-,7/2-	13	1364	1340 – граница континуума			
18	1369.7	3/2+					13	1370
19	1395.1	5/2	14	1395.2			14	1390
20	1454.2	1/2+,3/2+					15	1480
21	1482.9	7/2+,9/2+	15	1484.7			16	1484
22	1491.05	15/2+	16	1491.2			17	1500
			17	1500.5				
23	1571	1/2-,3/2-	18	1570				
24	1603.06	7/2-,9/2-					18	1600
25	1603.7	11/2+,13/2+	19	1605.2				
26	1665.2	5/2+	20	1664.9			19	1670
27	1679	9/2+	21	1670			20	1680
28	1682	9/2+	22	1682.8			21	1681
29	1686.1	13/2+						
30	1693.2	3/2+,5/2+						1690
31	1712.4	5/2+	23	1710			22	1950
			1710 – граница континуума				23	2155
							2177 – граница континуума	

Рассмотрим теперь неупругое рассеяние с образованием ниобия-93 в изомерном состоянии. Таковым является первое возбужденное состояние этого ядра, имеющее период полураспада 16.13 г. Данные о сечении образования этого состояния содержатся в оценке ENDF/B-VII и в библиотеке EAF-2003. На рис.9 эти оценки сравниваются друг с другом и с экспериментальными данными. Приведено также сечение образования изомера, полученное на основе данных БРОНД-2 в предположении, что изомер со 100-процентной вероятностью образуется при возбуждении уровней 1, 2, 5, 9 и 14 и не образуется при возбуждении других уровней с энергиями возбуждения ниже порога континуума (что соответствует схеме распада, рекомендованной в PCNUDAT на основе ENSDF) и с вероятностью 14% при возбуждении континуума уровней. Последняя вероятность подобрана эмпирически.

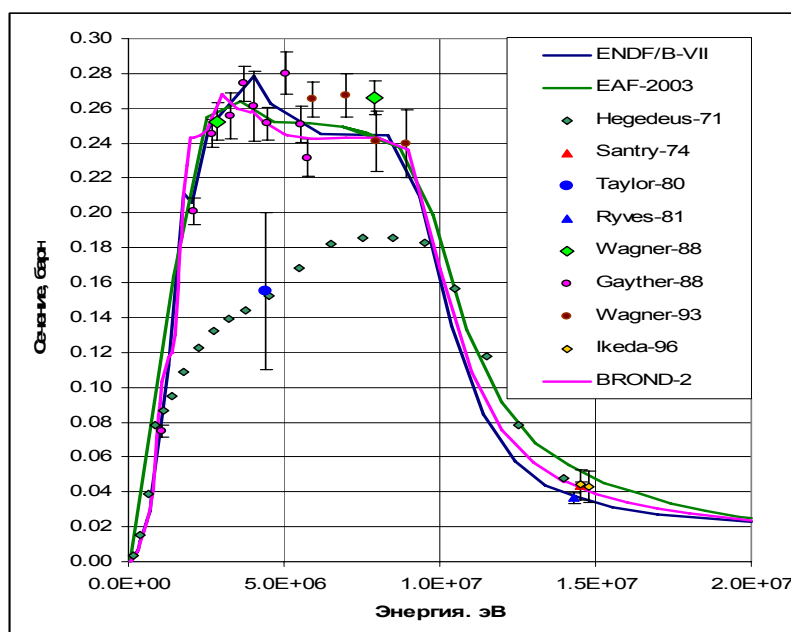


Рис. 9. Сечение образования долгоживущего изомера ниобия-93

Нерегулярное поведение сечения образования изомера в оценках ENDF/B-VII и БРОНД-2 обусловлено конкуренцией вклада различных уровней в сечение образования и не является чем-то неожиданным. Ясно, что “в чистом виде” оценка EAF-2003 не может быть рекомендована в РОСФОНД, поскольку ход сечения вблизи порога совершенно не соответствует ходу сечения возбуждения первого уровня – единственного при этих энергиях канала образования изомера. Вполне естественно рекомендовать **принять в РОСФОНД сечение образования изомера, следующее из данных БРОНД-2.**

2.4. Сечения реакций (n,xn)

2.4.1. Реакция (n,n'α) имеет порог 1.97 МэВ. Все оценки сечения этой реакции существенно расходятся с имеющимися экспериментальными данными (см. рис. 10).

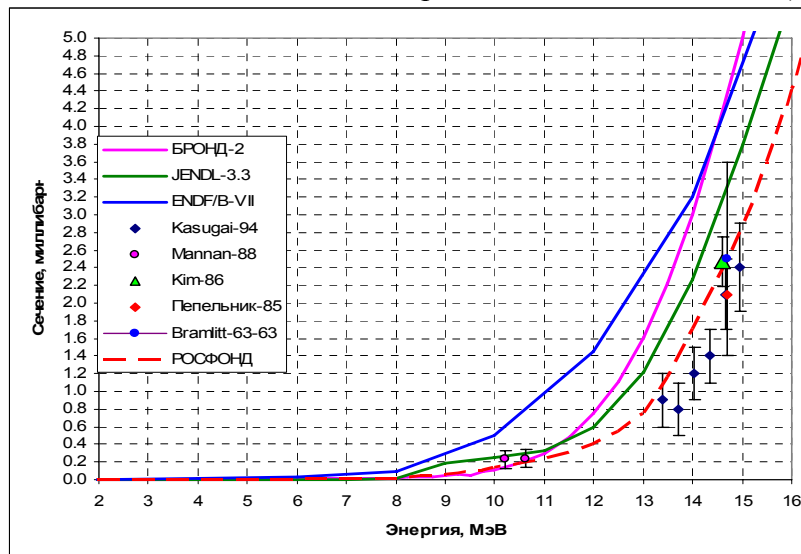


Рис.10. Сечение реакции (n,n'α)

Несмотря на то, что реакция (n,n'α) из-за низкого сечения не играет существенной роли в практических приложениях, **представляется целесообразным понизить сечение этой реакции в РОСФОНДе так, чтобы оцененная кривая проходила через согласующиеся друг с другом экспериментальные точки** (см. рис.9).

2.4.2. Реакция (n,n'p) имеет порог 6.1 МэВ. Оцененные сечения этой реакции показаны на рис. 11.

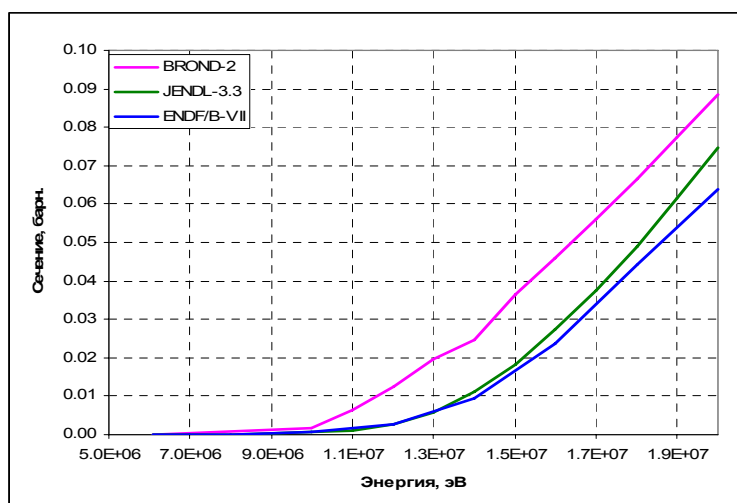


Рис. 10 сечение реакции (n,n'p)

Ход сечения, принятый в библиотеках JENDL-3.3 и ENDF/B-VII представляется более естественным. **В РОСФОНД рекомендуется оценка JENDL-3.3.**

2.4.3. Реакция $(n,2n)$ имеет порог 8.9 МэВ. Оцененные сечения этой реакции показаны на рис. 11. Они близки друг к другу и подтверждаются экспериментальными данными в равной степени. В РОСФОНД рекомендуется оценка БРОНД-2.

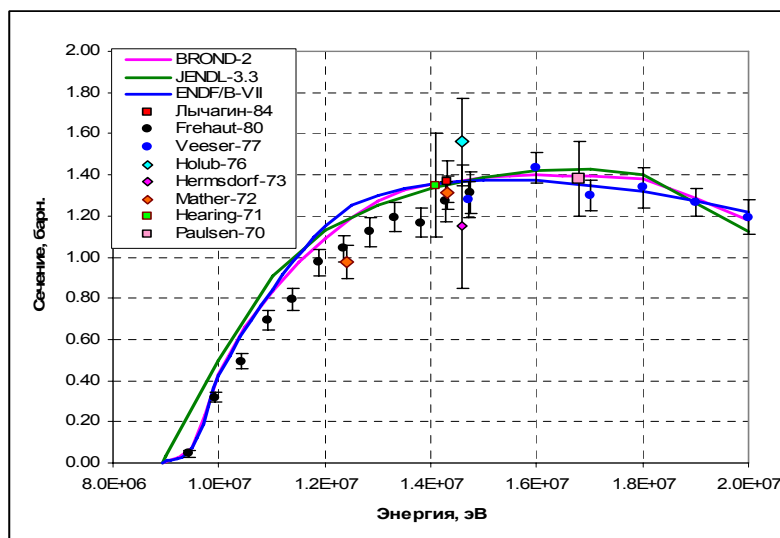


Рис.11. Сечение реакции $(n,2n)$.

2.4.4. Реакции $(n,n'd)$ и $(n,n't)$ имеют пороги 12.6 МэВ и 13.75 МэВ соответственно. Оцененные сечения этих реакций показаны на рис. 12. В JENDL-3.3 сечение этих реакций не приводится. Экспериментальные данные отсутствуют. В РОСФОНД рекомендуются оценки БРОНД-2.

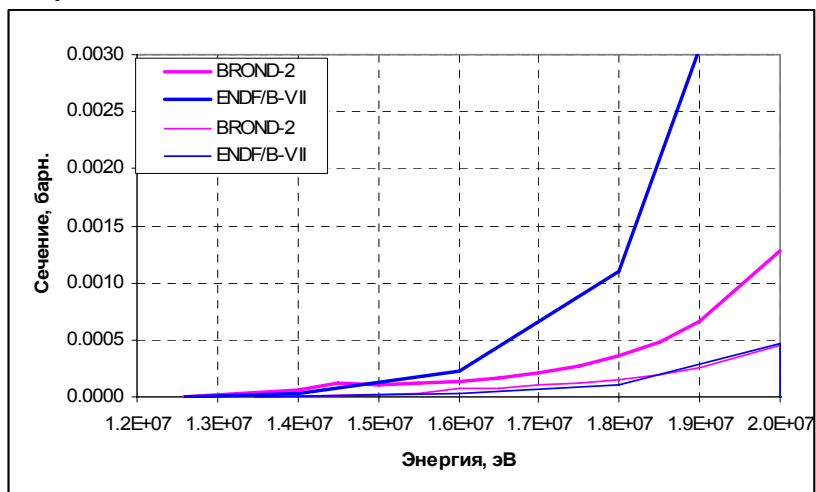


Рис.12. Сечение реакций $(n,n'd)$ (толстые линии) и $(n,n't)$ (тонкие линии).

2.4.5. Реакция $(n,3n)$ имеет порог 16.9 МэВ. Оцененные сечения этой реакции показаны на рис. 13. В РОСФОНД рекомендуется оценка ENDF/B-VII

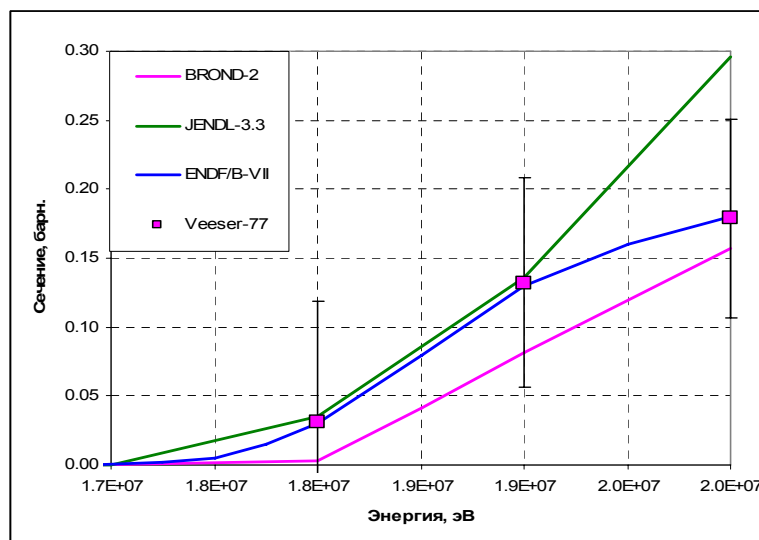


Рис.13. Сечение реакции (n,3n)

2.4.6. Реакция $(n,n^3\text{He})$ имеет порог 17.4 МэВ. Оцененные сечения этой реакции из библиотек общего пользования содержит только БРОНД-2. При 20 МэВ сечение составляет около 2.5 микробарн. В библиотеке EAF-2003 приводится сечение этой реакции меньшее еще на три порядка. В РОСФОНД включать сечение этой реакции не целесообразно.

2.5. Сечение упругого рассеяния

Как и в других оценках, сечение упругого рассеяния в РОСФОНДе рекомендуется получить из условия баланса.

3. Энерго-угловые распределения вторичных нейтронов

3.1. Угловые распределения упругого рассеяния

Во всех оценках угловые распределения упруго рассеянных нейтронов заданы в форме коэффициентов разложения по полиномам Лежандра в системе координат центра инерции.

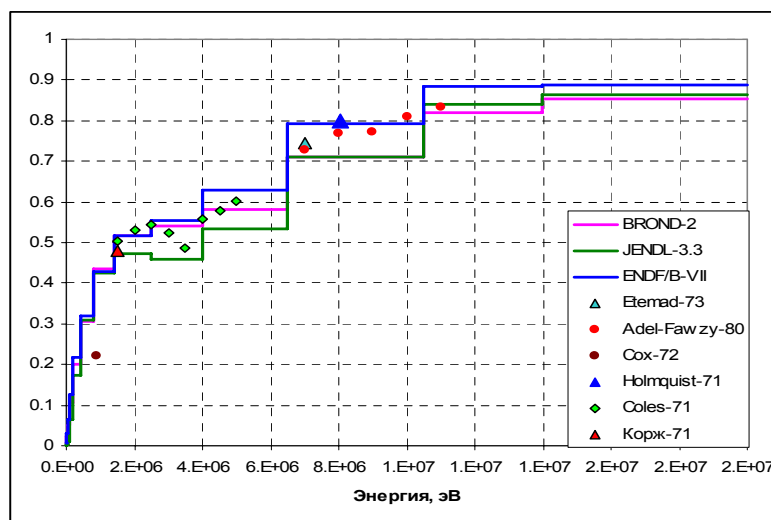


Рис.14. Энергетическая зависимость среднего косинуса угла упругого рассеяния по различным оценкам в сравнении с экспериментальными данными

Во всех библиотеках эти данные получены расчетным путем на основе оптической модели. На рис. 14 сравниваются средние косинусы угла рассеяния (в лабораторной

системе координат), представленные в групповой форме. Там же приведены имеющиеся экспериментальные данные (представленные в форме коэффициентов разложения по полиномам Лежандра самими авторами). **Как видно, оценка Проняева, согласуется с ними наилучшим образом. Эта оценка и рекомендуется в РОСФОНД**

3.2. Угловые распределения неупругого рассеяния с возбуждением дискретных уровней.

В оценке Проняева угловые распределения нейтронов, неупруго рассеянных с возбуждением дискретных уровней приняты изотропными за исключением уровней с энергиями 744, 808.7, 949.9, 979.1, 1279 и 1297 кэВ, характеризующихся высокими значениями спина. В оценке Каваи угловые распределения неупругого рассеяния на всех уровнях анизотропны и описываются 5 коэффициентами разложения по полиномам Лежандра. В оценке Чедвика в рассматриваемой энергетической области все угловые распределения изотропны.

Анизотропные угловые распределения и в оценке Проняева и в оценке Каваи получены, естественно, расчетным путем. Подход Каваи, описавшего анизотропию рассеяния на всех уровнях единообразно, представляется более последовательным. Поэтому для **первых 12-ти уровней угловые распределения в РОСФОНД целесообразно принять из оценки Каваи, а для остальных – изотропными – как в остальных оценках.**

3.3. Континуальные энерго-угловые распределения.

В оценках Каваи и Чедвика угловые и энергетические распределения всех реакций с непрерывным спектром вторичных нейтронов приняты независимыми и задаются в соответствующих секциях файлов MF=4 и MF=5. В оценке Проняева энерго-угловые распределения неупругого рассеяния с возбуждением континуума уровней и реакций (n,2n) и (n,n'p) представлены в файле MF=6 на основе расчетов по статистической модели с учетом предравновесных процессов³. Заметим, что для первого и второго нейтронов реакции (n,2n) приводятся разные распределения.

В РОСФОРД следует принять данные из БРОНД-2.

4. Образование фотонов в нейтронных реакциях.

Во всех оценках образование фотонов описывается для радиационного захвата и для суммарного неупругого взаимодействия (без учета вклада захвата). Образование фотонов в оценке Проняева приняты такими, как в ENDF/B-IV, где они построены, в основном, на основе экспериментальных данных. В двух других оценках приняты результаты модельных расчетов.

В РОСФОНД следует принять данные из БРОНД-2.

5. Заключение

Файл оцененных нейтронных данных для библиотеки РОСФОНД строится на основе файла из библиотеки БРОНД-2 (=ФОНД-2) со следующими изменениями

1. В области неразрешенных резонансов принять данные Каваи, устранив все нерезонансные подложки, кроме неупругого рассеяния (см. раздел 1.2).

³ Kalka H., Seeliger D., Zhivopistsev F.A. Z.Phys. A329,1988, P.331

2. Вне резонансной области полное сечение принять до 3 МэВ из JENDL-3.3, а выше – из ENDF/B-VII (см. раздел 2.1).
3. Слегка откорректировать сечение неупругого рассеяния с возбуждением континуума уровней (см. раздел 2.3).
4. Понизить сечение реакции $(n, n'\alpha)$ для согласия с экспериментальными данными (см. раздел 2.4.1).
5. Исключить данные о реакции $(n, n'\text{}^3\text{He})$ (см. Раздел 2.4.5)
6. Исключить данные об образовании изомера ниобия-92 в реакции $(n, 2n)$ (MF=3, MT=26).
7. Внести данные о сечении образования изомера ниобия-93 в файл MF=10, MT=4 (см. раздел 9.3)
8. Ввести файл MF=9 с данными о сечениях образования долгоживущих изомеров в реакциях $(n, 2n)$ и $(n, 3n)$ взяв информацию из EAF-2003.
9. Угловые распределения неупругого рассеяния для MT=51 – 62 взять из JENDL-3.3 (см. раздел 3.2)

Автор отбора данных:

Николаев М.Н.

41.6. Ниобий-93^m

Долгоживущий изомер. Испытывает изомерный переход в основное состояние ($T_{1/2}=16.13\text{г.}$).

В библиотеке ФОНД-2.2 были включены оцененные данные из EAF-99 (J.Kopecky, D.Nierop, 1992). Указано, что сечение радиационного захвата принято в соответствии с ENDF/B-V.

В EAF-2003 (R.Forrest, J.Kopecky, J.-Ch. Sublet, 2003) сечение радиационного захвата принято в соответствии с ENDF/B-VI, и существенно отличается от предыдущей версии (см. рис.1).

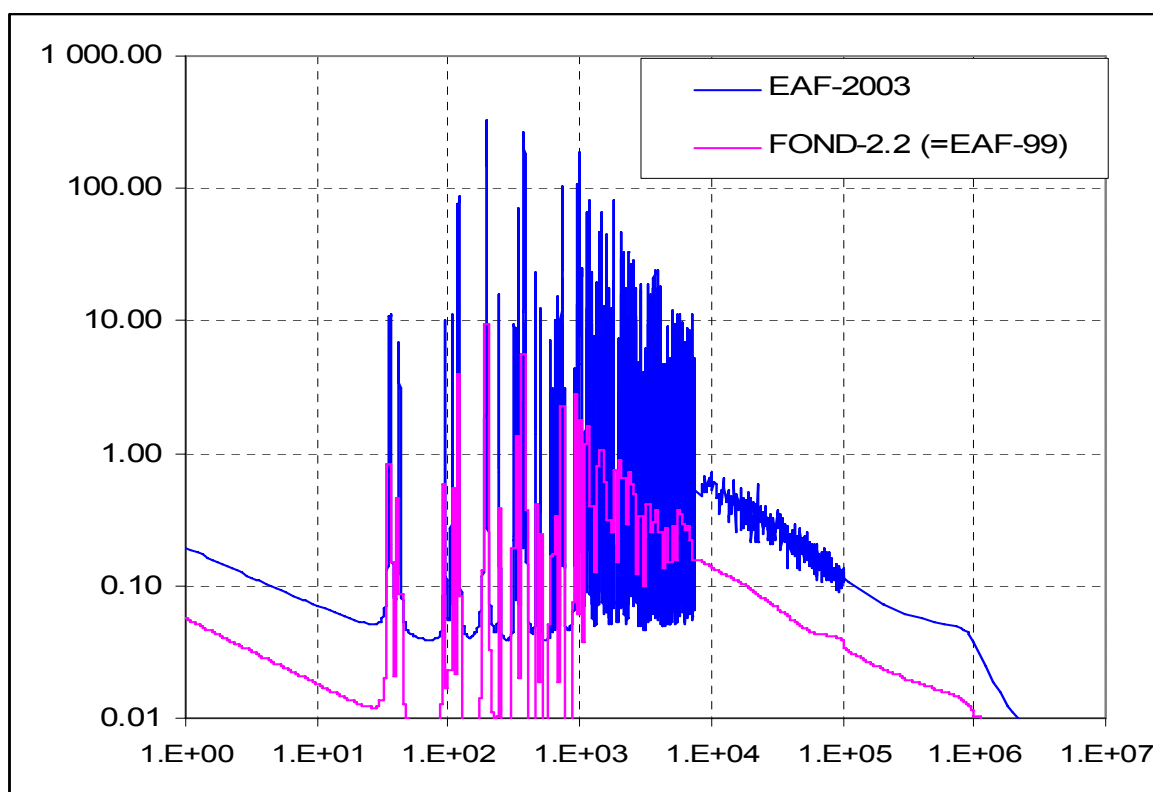


Рис. 1. Сечение захвата нейтронов в $^{93}\text{Nb}^m$

Файлы данных для изомера $^{93}\text{Nb}^m$ в доступных версиях этих библиотек отсутствуют. Ясно, однако, что в их основе лежит экспериментальная информация, поскольку сечения носят резонансный характер. Между тем в базе данных EXFOR никакой экспериментальной информации о нейтронных сечениях для изомерного состояния ниобия не содержится.

В таблице 1. приведены значения тепловых сечений и резонансных интегралов захвата в сравниваемых оценках.

Таблица 1. Характеристики захвата нейтронов в $^{93}\text{Nb}^m$

Оценка	σ_c (0.0253 эВ)	RI_c
EAF-99	0.36	2.84
EAF-2003	1.16	9.74

Из таблицы следует, что и тепловое сечение и резонансный интеграл возросли примерно одинаково (в 3.2 и в 3.4 раза), что, вместе с данными рис. 1 указывает на то, что основной процедурой пересмотра сечений явилась перенормировка данных.

Заключение

Естественно, решено в РОСФОНД включить последнюю оценку. Сечения реакций с $MT=16, 17, 22, 33, 34, 106$ и 107 , данные для которых в EAF-2003 представлены в файле MF=10, просуммированы по подсекциям и суммы записаны в файл MF=3. Для реакций $MT=16$ и $MT=17$, в результате которых образуются долгоживущие изомеры, получены вероятности образования конечного ядра в основном и изомерном состояниях и занесены в файл MF=9.

Автор отбора данных

Николаев М.Н.

41.7. Ниобий-94

Радиоактивен. Испытывает бета-распад ($T_{1/2}=2 \cdot 10^4$ г.) в стабильный ^{94}Mo .

Во всех библиотеках общего пользования содержится одна и та же оценка, выполненная рабочей группой по оценке нейтронных данных для JENDL-3.3 в 1990 г.

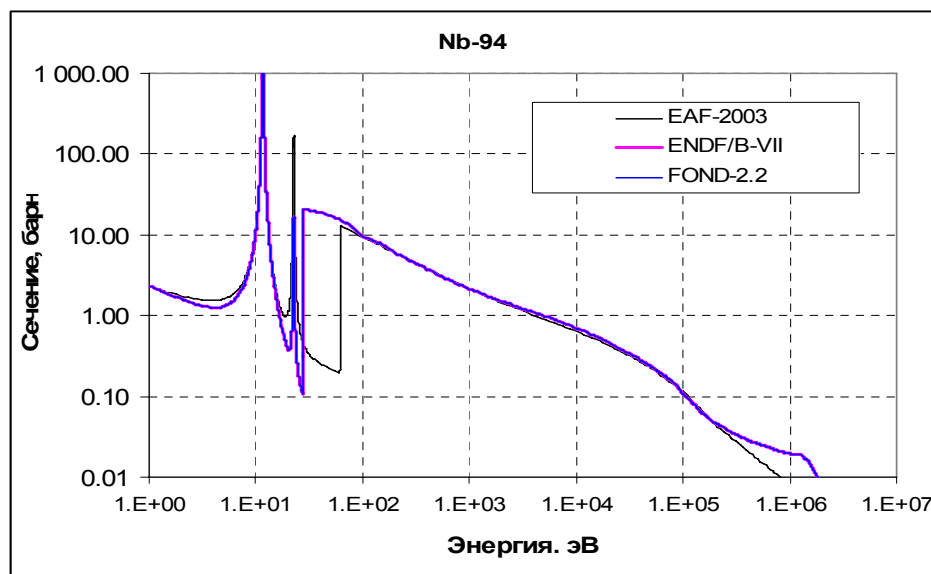
В EAF-2003 приведена иная оценка – для сечения радиационного захвата там приняты данные из JEF-2.2, позаимствованные, в свою очередь, из ENDF/B-V.

В нижеследующей таблице приведены (в барнах): сечение захвата в тепловой точке, резонансный интеграл и сечения основных реакций, усредненные по спектру деления программой INTER.

	σ_c (0.0253 эВ)	RI_c	Средние сечения реакций на спектре деления				
			n,gamma	n,2n	n,3n	n,p	n,alpha
JENDL-3.3	15.77	126	0.0143	6.92E-03	2.05E-06	3.75E-04	1.02E-04
EAF-2003	13.61	117	0.0130	5.43E-03	1.85E-06	6.27E-04	7.78-05

Как видно, разительных различий нет.

На рисунке сравниваются энергетические поведения сечения захвата из прежней и новой оценок.



Сечение захвата ниобия-94

Заключение

В РОСФОНД включить ту же оценку, что и во всех остальных библиотеках, дополнив ее файлом MF=9, в котором привести вероятности образования долгоживущих изомеров в реакциях (n,2n), (n,3n) и (n,γ), получив их из сечений, приведенных в файле MF=10 библиотеки EAF-2001.

Автор отбора данных
Николаев М.Н.

41.8. Ниобий-95^g

Радиоактивен. Испытывает бета-распад ($T_{1/2}=34.97$ дн.) в стабильный ⁹⁵Mo.

Во всех зарубежных библиотеках общего пользования содержится одна и та же оценка, выполненная рабочей группой по оценке нейтронных данных для JENDL-3.3 в 1990 г. от 25 эВ до 100 кэВ в этой оценке описана область неразрешенных резонансов; разрешенных резонансов нет. Тепловое сечение захвата опирается на единственное измерение Гальперина (1963 г.)

В библиотеке ФОНД-2.2 содержится та же оценка, в которой, однако, сечения реакций (n,2n) и (n,3n) уточнены на основе полуэмпирической систематики В.Н. Манохина.

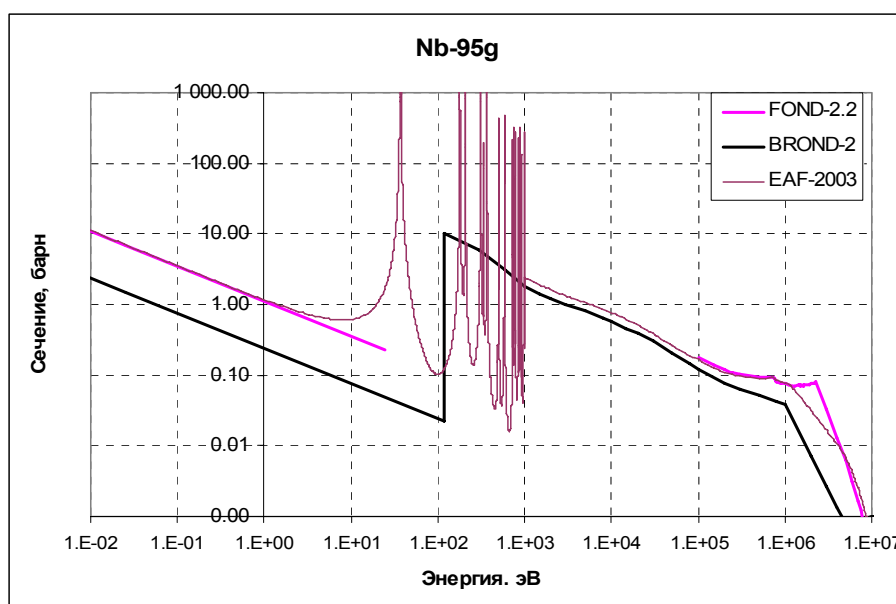
В библиотеку БРОНД включена оценка Грудзевича и Зеленецкого, выполненная в том же 1990 г. Резонансной области в ней нет.

В EAF-2003 приведена иная оценка – для сечения радиационного захвата там приняты данные из JEF-2.2, полученные путем случайного розыгрыша из принятого распределения средних параметров. В результате получена искусственно введенная резонансная структура.

В нижеследующей таблице приведены (в барнах): сечение захвата в тепловой точке, резонансный интеграл и сечения основных реакций, усредненные по спектру деления программой INTER.

	σ_c (0.0253 эВ)	RI _c	Средние сечения реакций на спектре деления				
			n,gamma	n,2n	n,3n	n,p	n,alpha
JENDL-3.3	7.0	41.8	0.0637	2.90E-3	3.51E-6	6.65E-5	2.52E-5
БРОНД-2	1.5	15.98	0.0257	2.80E-3	2.61E-6	3.07E-5	4.93E-5
EAF-2003	7.0	256.16	0.0538	3.60E-3	2.60E-6	2.24E-4	1.74E-5

На рисунке сравниваются энергетические поведения сечения захвата из сравниваемых оценок. Разброс значений резонансных интегралов можно рассматривать в качестве меры погрешности, с которой известна эта величина.



Сечение захвата ниобия-95

Заключение

В РОСФОНД включить оценку из JENDL-3.3, дополнив ее файлом MF=9, в котором привести вероятность образования долгоживущего изомера в реакции (n,3n), , получив ее из сечений, приведенных в файле MF=10 библиотеки EAF-2001.

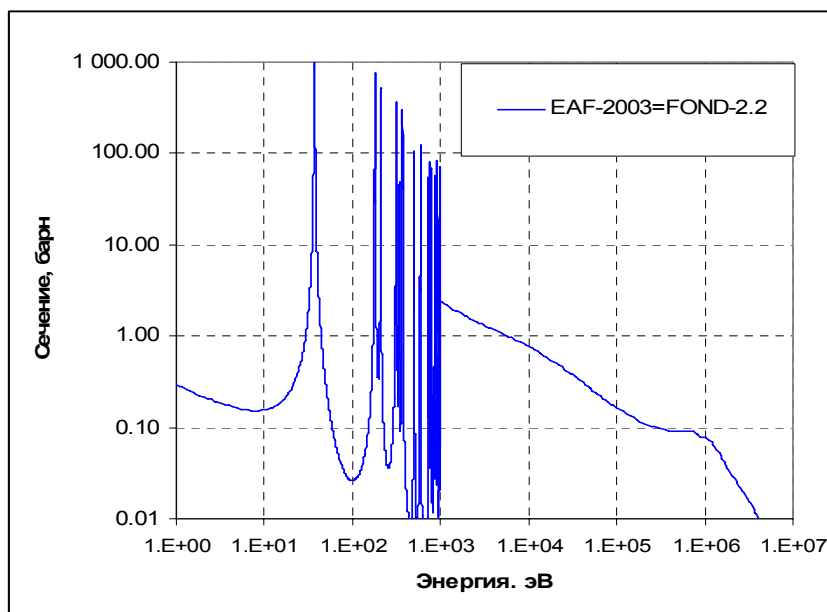
Автор отбора данных
Николаев М.Н.

41.9. Ниобий-95^m

Долгоживущий изомер. Испытывает изомерный переход в основное состояние и бета-распад в стабильный ⁹⁵Mo. (T_{1/2}=86.6 ч.).

В ФОНД-2.2 содержится оценка Копецкого и Ниеропа 1992 г. В EAF-2003 включена слегка пересмотренная оценка с добавлением данных о сечениях образования изомерных состояний (файл 10).

На рисунке приведена энергетическая зависимость сечения захвата.



В нижеследующей таблице приведены (в барнах): сечение захвата в тепловой точке, резонансный интеграл и сечения основных реакций, усредненные по спектру деления программой INTER.

	σ_c (0.0253 эВ)	RI _c	Средние сечения реакций на спектре деления				
			n,gamma	n,2n	n,3n	n,p	n,alpha
FOND-2.2	1.77	69.76	0.0537	5.70E-4	3.28E-6	2.17E-5	1.74E-5
EAF-2003	1.77	67.81	0.0538	3.55E-3	2.61E-6	1.52E-4	1.71E-5

Как видно, существенное изменение претерпело лишь сечение реакции (n,2n).

Заключение

В РОСФОНД включить оценку из EAF-2003, заменив файл MF=10 файлом MF=9, в котором привести вероятность образования долгоживущего изомера в реакции (n,3n), и включить в файл MF=3 секции сечений тех реакций, которые содержатся в файле MF=10 библиотеки EAF-2001.

Автор отбора данных
Николаев М.Н.

41.10. Ниобий-96

Радиоактивен. Испытывает бета-распад ($T_{1/2}=23.4$ ч.) в стабильный ^{96}Mo .

В библиотеках данных для расчета переноса нейтронов данные для ниобия-96 отсутствуют. В активационных библиотеках содержатся:

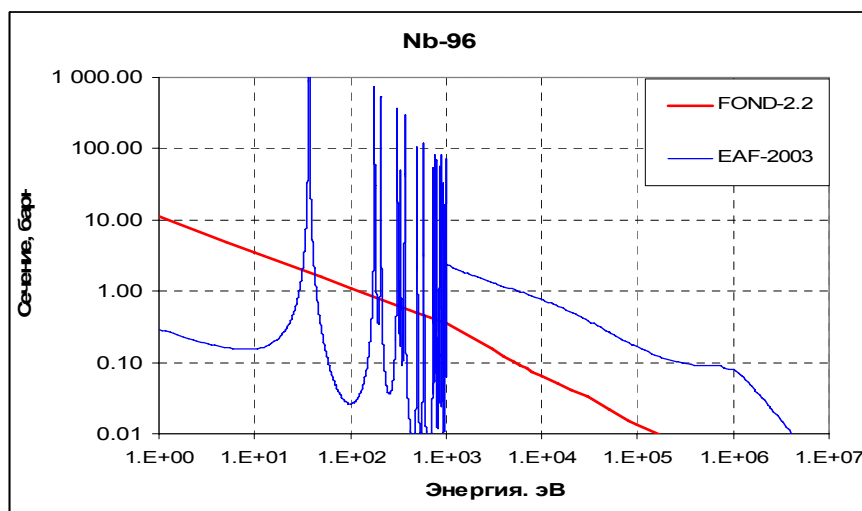
в EAF-3=ADL-3 – оценка Грудзевича и др. 1994 г. (принята в ФОНД-2.2).

в EAF-2003 – по существу новая оценка с существенной модификацией сечения захвата на основе программы MASGAM, с помощью которой путем случайной выборки из средних резонансных параметров получен детальный ход сечений.

В нижеследующей таблице приведены (в барнах): сечение захвата в тепловой точке, резонансный интеграл и сечения основных реакций, усредненные по спектру деления программой INTER.

	σ_c (0.0253 эВ)	RI_c	Средние сечения реакций на спектре деления				
			N_{γ}	n,2n	n,3n	n,p	n,alpha
ФОНД-2.2	69.87	34.36	0.0021	6.95E-03	4.14E-06	4.59E-05	8.09E-06
EAF-2003	17.23	188.2	0.0203	5.48E-03	1.85E-06	4.59E-05	7.79E-05

Энергетический ход сечений захвата по разным оценкам показан на рисунке. Колоссальный разброс оценок сечения захвата очевиден. Он отражает уровень знаний о сечении захвата рассматриваемого сравнительно короткоживущего продукта деления. Что касается сечений иных, менее важных реакций, то столь большого разброса данных в них не наблюдается, поскольку все они основаны на сходных модельных расчетах и не зависят от случайного расположения уровней составного ядра в окрестности энергии связи.



Сечение радиационного захвата.

Заключение

Целесообразно включить в РОСФОНД оценку EAF-2003, включив в файл MF=3 секции сечений тех реакций, которые содержатся в файле MF=10 библиотеки EAF-2003, а сам файл MF=10 исключить, т.к. долгоживущих изомеров в нейтронных реакциях на ниобии-96 не образуется.

Автор отбора данных

Николаев М.Н.